

部分放電により発生する電磁波の周波数解析

東中 俊幸・上野 秀樹・中山 博史

(電気系工学専攻)

Frequency Analysis of Electromagnetic Waves Caused by Partial Discharge

Toshiyuki HIGASHINAKA, Hideki UENO and Hiroshi NAKAYAMA

(Department of Electrical Engineering and Computer Sciences)

Abstract

This paper describes frequency analysis of electromagnetic waves caused by partial discharge. The investigated electrode configuration is composed of a needle electrode and a plane electrode. The discharge inception voltage rose as the gap length increased. And the discharge inception voltage rose when the gap length was small. This difference on the discharge inception voltage should be affected by changing the width of the gap length. When the electromagnetic wave was measured using a spectrum analyzer, the electromagnetic waves were with around 150 MHz were detected in oil. While, the waves with around 60 MHz were detected in air. In addition, the appearance of the discharge images was observed with the image-intensified still camera.

Key words : partial discharge, electromagnetic wave, transformer

1. はじめに

現在、わが国において電力機器は電力供給の基盤として位置づけられ、変圧器やガス絶縁開閉装置(Gas insulated switchgear: GIS)などの変電機器は、中心的な役割を担っており、数多くの機器が日夜運転されている[1]。その中、変圧器や GIS などの変電機器の延命化がはかられており、そのためには、事故を未然に防止するための予測保全の観点からの機器診断技術の開発と適用が要請されている。変圧器、GIS 等の内部での絶縁異常要因の中で、最も問題となるのは微小な金属異物の存在であり、この検出方法として部分放電(Partial discharge: PD)等による診断技術が幅広く検討されている[2]。

複合誘電体を有する電極配置に高い電圧を印加すると、電界の強いところで局所的な放電が生ずる。これを部分放電と呼ぶ[3]。部分放電の検出方法(PD 測定技術)としては、部分放電の発生にともない生じる高周波電圧・電流[4・6]、電磁波[7・10]、光[11]、音波[12・14]を検出する電気的、光学的、音響的方法などがある。特に一つのセンサで広範囲の部分放電が検出可能であること、いくつかのセンサの組み合わせで発生位置の特定が可能であること、検出感度も比較的良好であることなどから、部分放電による放射電磁波の測定[7・10]あるいは音波[2,12・13]の測定はそれゆえ機器外部からの電磁波、音波による部分放電検出、劣化診断技術の研究開発が進められている。特に、検出範囲等の点から外部に放射される電磁波を計測する手法が目玉されている。放射電磁波を用いた PD 測定技術は、機器の内部において発生する PD を絶縁劣化の初期の段階から電気的に検知しようとするものであり、全体的な損傷や事故を未然に防ぐ上で有用な技術と考えられている。しかしその反面、その信号が極めて微弱であることもあり、外部から機器に伝搬・侵入してくる外部ノイズとの分離が技術確立の必要条件となってくる[9]。そこで本実験では、未だ、解明されていない油中で発生する部分放電と放射電磁波の周波数特性について、基礎的かつ有用な知見を蓄積すること[14]を目的に、針-平板電極間に固体絶縁物板を挿入した系の油中における部分放電と周波数特性について検討を行った。また、比較として気中においても同様の測定を行った。

2. 実験方法

本実験で用いた電極構成を Fig.1 に示す。針電極(Needle electrode)、平板電極(Plane electrode)によって構成されている。平板電極には黄銅製平板を用いた。Fig.1 のように平板電極の上部には絶縁破壊を引き起こさないように $100 \times 100 \text{ mm}^2$ 、厚さ 0.5 mm の硼硅酸ガラスを配置した。このガラスの体積抵抗率は約 $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$ 、表面抵抗率が $10^{11} \Omega$ 、比誘電率が 7.0 である[15]。針電極先端からガラスまでの距離をギャップ長 g とした。本実験では、ギャップ長を変化、つまり、電界を変化させることによってさまざまな特性の影響について調べた。この電極系をアーク放電により劣化させた絶縁油(高圧絶縁油 K, 新日本石油株式会社)で満たされたビーカーに浸漬し、部分放電における電磁

波スペクトルの測定、コロナの様子を観察した。また、気中の場合も同様の測定を行った。

Fig.2 に回路図を示す。電源には交流電源(60Hz)を用いた。ネオントランス(電流容量 20mA)とブロッキングコイル 10.1mH を介し、放電部には分圧用コンデンサ C_1 , C_2 を並列に接続し、デジタルオシロスコープ(DL-1540, 150MHz, 横河電機(株))にて、コンデンサ C_2 の電圧を測定した。ここで用いたコンデンサ C_1 , C_2 はそれぞれ 1034pF, $2\mu\text{F}$ である。また、放電部に直列に接続した検出抵抗 $10\text{k}\Omega$ と並列にハイパスフィルタ(1kHz 以下遮断)を接続し、フィルタを介してデジタルオシロスコープを用いて電流波形を測定した。ハイパスフィルタの回路定数については電源周波数をカットし、高周波数である放電パルスのみを観測できるように定めた。放電により発生した放電パルスが最初に生じた瞬間をコロナ開始と定め、その時に印加した電圧を放電開始電圧と定めた。部分放電の様子はイメージインテンシファイア(XX1500, Philips Ltd.)を接続した一眼レフカメラ(AE-1, Canon)で撮影した。いずれの撮影においても、数回撮影を行い、最も多く観測された放電の様子を調べた。

部分放電からの放射電磁波スペクトルは放電部から水平距離約 0.45m, 垂直距離約 0.10m の位置にモバイル用ディスプレイアンテナ(ダイヤモンド牌, D220, 周波数域 0MHz~250MHz)およびパーソナルコンピュータを用いて測定した。

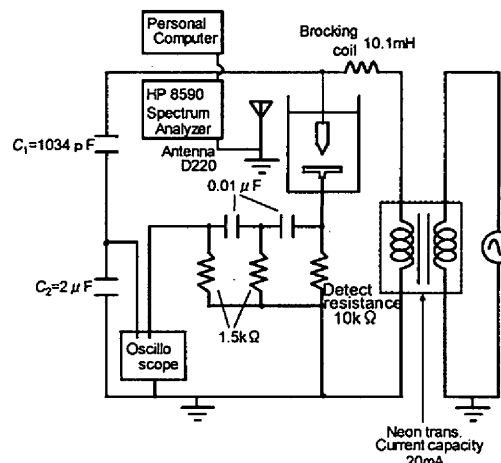


図2 実験回路図
Fig.2 Experimental circuit diagram

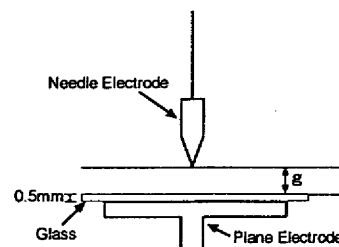


図1 電極構成図
Fig.1 Electrode configuration

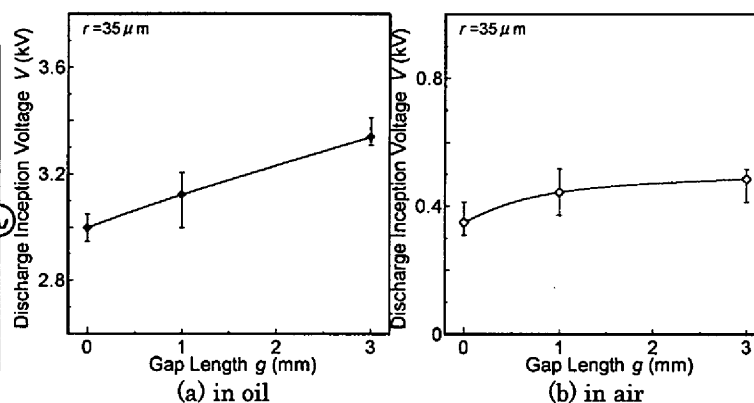


図3 放電開始電圧のギャップ長依存性
Fig.3 Gap length dependence on discharge inception voltage

3. 実験結果

3.1 放電開始電圧のギャップ長依存性

油中、気中での測定、またはギャップを変化することによって放電開始電圧は変化する。そこで、各条件の放電開始電圧を測定した。

ギャップ長 g を 0mm, 1mm, 3mm と変化させたときの放電開始電圧のギャップ長依存性について Fig.3 に示す。Fig.3(a)は油中、Fig.3(b)は気中の測定結果である。測定は同一条件で 5 回行い、その平均値を最大値及び最小値とともに図中に示した。

油中、気中ともにギャップ長を大きくすると放電開始電圧は上昇した。油中のときの放電開始電圧は順に 2.99, 3.12, 3.33kV となる。放電開始電圧の上昇度はそれぞれ 0.12, 0.11kV/mm となり、ギャップ長に対して比例関係にある。気中のときの放電開始電圧は順に 0.34, 0.44, 0.48kV となり、上昇度は 0.09, 0.02kV/mm となり、ギャップ長を大きくすると飽和する。後述の実験における印加電圧は部分放電が実際に発生する様に本放電開始電圧を元に設定した。

3.2 部分放電から放射される電磁波強度の周波数特性

3.2.1 油中の場合

本研究の測定において、シールドルーム等の中で行っていないために外部ノイズ電磁波が混入してくる。そのために、部分放電からの放射電磁波と外部ノイズ波を区別する必要がある。Fig.4 は外部ノイズ電磁波の周波数特性を示す。縦軸は電磁波強度(mV), 横軸は周波数(MHz)である。同一条件で 20 回測定したデータを周波数毎に電磁波強度を合計したものを図中に示した。周波数が

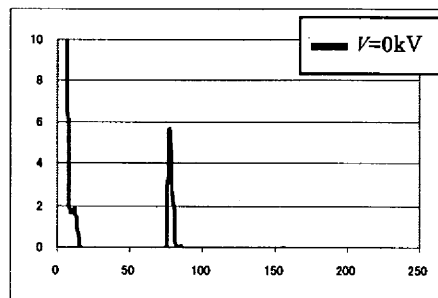


図4 外部ノイズ電磁波強度一周波数特性
Fig.4 Level of background electromagnetic wave
Frequency characteristics

約 77MHz でピークが見られた。電磁波の強度に変化はあるが、周波数に変化は見られないため、この周波数帯域に出るピークを外部ノイズ波とする。

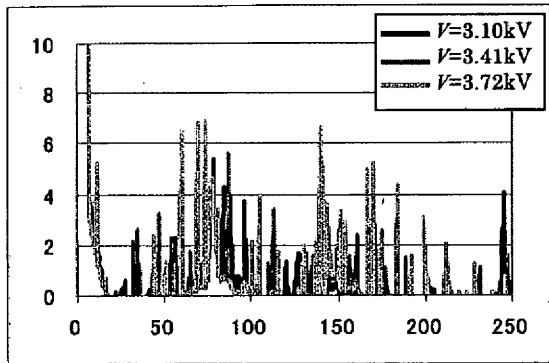
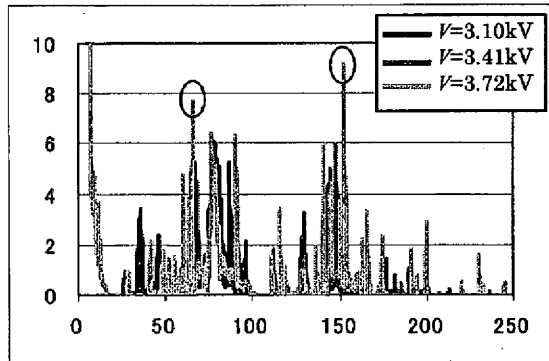
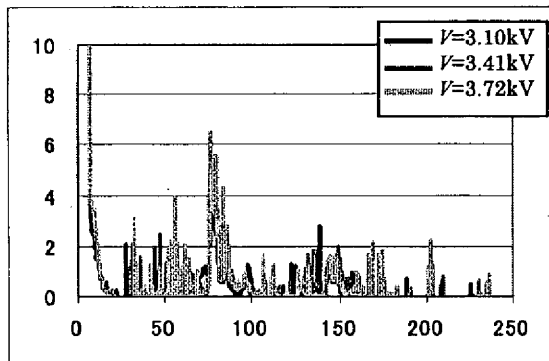
(a) $g=0\text{mm}$ (b) $g=1\text{mm}$ (c) $g=3\text{mm}$

図 5 電磁波強度－周波数特性
Fig.5 Level of electromagnetic wave
-Frequency characteristics

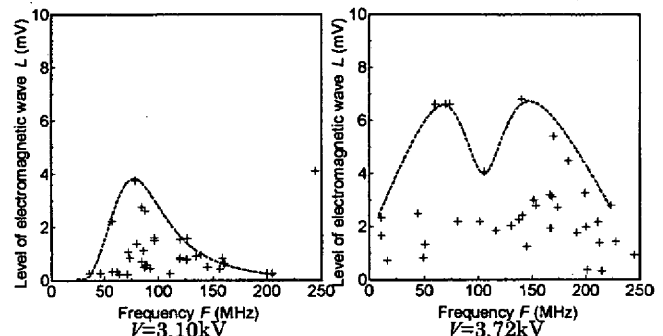
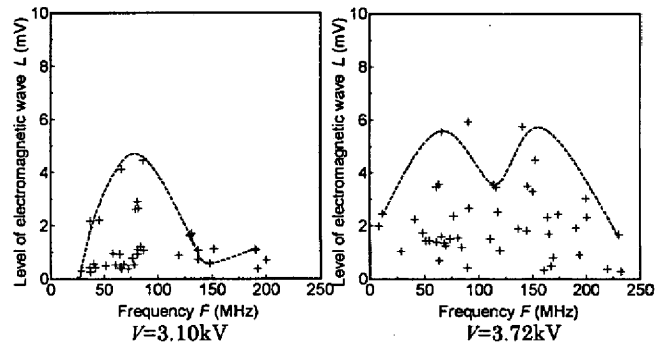
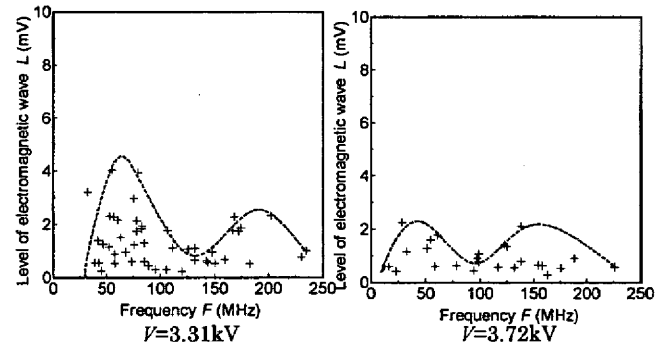
(a) $g=0\text{mm}$ (a) $g=1\text{mm}$ (c) $g=3\text{mm}$

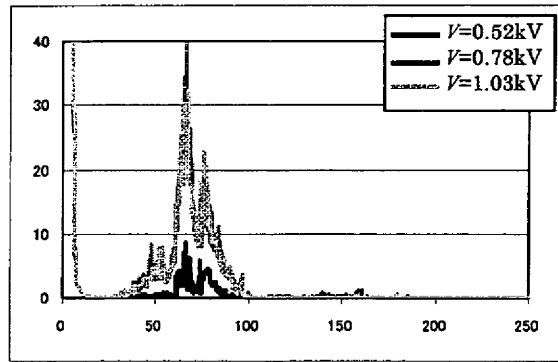
図 6 電磁波強度－周波数分布図
Fig.6 Level of electromagnetic wave-frequency
distribution chart

周波数と部分放電から放射される電磁波強度の関係を Fig.5 に示す。縦軸、横軸、測定方法は Fig.4 のときと同様である。 $g=0\text{mm}$ のスペクトルを見ると、 $V=3.10\text{kV}$ に対して $V=3.72\text{kV}$ の方が多く確認できる。このことから、印加電圧を増加することによって電磁波の出る周波数帯が増加する。 $f=150\text{MHz}$ 付近に頻繁に電磁波が確認でき、その帯域の電磁波の強度が強くなる。 $g=1\text{mm}$, 3mm でも、 $f=150\text{MHz}$ 付近に電磁波が頻繁に見られたが、 $g=3\text{mm}$ では電磁波の強度はあまり強くない。 $g=0\text{mm}$, 1mm , 3mm のいずれの条件においても、印加電圧の増加に伴い電磁波の強度が強くなっている。さらに、 $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波強度に着目すると、 Fig.5(b) の $g=1\text{mm}$ の 2 点が大きくなっているところがあるが、ギャップ長を小さくすることによって $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波強度は強くなる。周波数と電磁波の強度の分布図を Fig.6 に示す。測定は先ほど行った 20 回の測定で得られたもので、電磁波強度のピークをプロットしたものである。+ のマークは電磁波が発生した周波数に対してのピークを示す。印加電圧を増加させると電磁波が頻繁に観測された周波数 $f=150\text{MHz}$ 付近にピークができるようになる。 Fig.6(a) の $g=0\text{mm}$ の 2 つの図を比較すると、 $V=3.10\text{kV}$ では 75MHz 付近 1 つのピーク、 $V=3.72\text{kV}$ では 70MHz 付近と 145MHz 付近に 2 つのピークができる。 $V=3.10\text{kV}$ に比べ、 $V=3.72\text{kV}$ の方が分布に広がりが見られる。2 つ目のピークは印加電圧を増加させることによって現われる。 $g=1\text{mm}$ でも $g=0\text{mm}$ と同様に $V=3.10\text{kV}$ では 75MHz 付近に、 $V=3.72\text{kV}$ では、

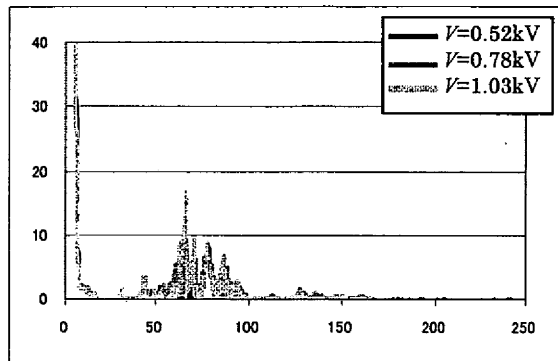
65MHz 付近と 155MHz 付近にピークが見られた. $g=3\text{mm}$ では, 両電圧に二つのピークが見られる. $V=3.31\text{kV}$ では 40MHz 付近と 150MHz 付近, 2 つ目のピークは 60MHz 付近と 180MHz 付近にピークが見られた. いずれの条件においても, 電磁波強度は印加電圧を増加させると電磁波の強度は大きくなる.

3.2.2 気中の場合

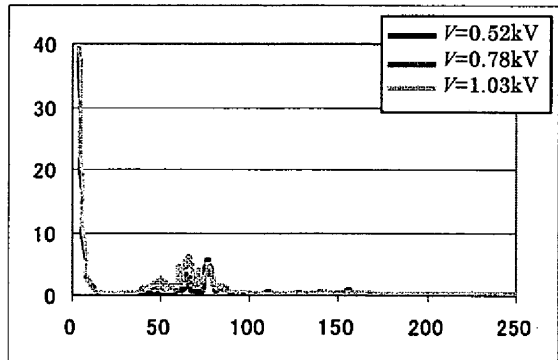
油中で行った測定を気中でも同様の測定を行った. 周波数と部分放電から放射される電磁波強度の関係を Fig.6 に示す. 縦軸, 横軸, 測定方法は Fig.4 のときと同様である.



(a) $g=0\text{mm}$

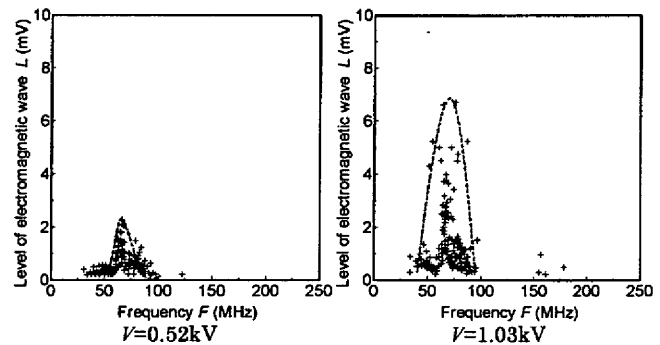


(b) $g=1\text{mm}$

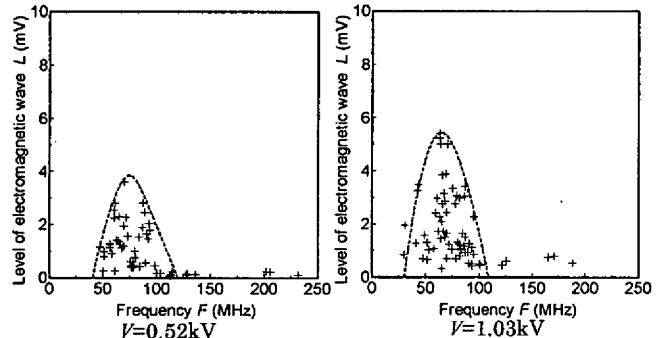


(c) $g=3\text{mm}$

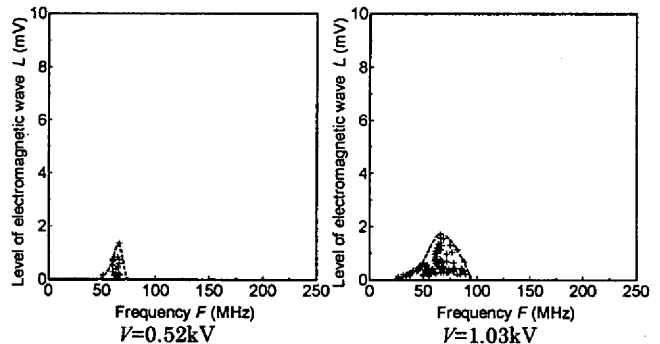
図 7 電磁波強度一周波数特性
Fig.7 Level of electromagnetic wave
-Frequency characteristics



(a) $g=0\text{mm}$



(b) $g=1\text{mm}$



(c) $g=3\text{mm}$

図 8 電磁波強度一周波数分布図
Fig.8 Level of electromagnetic wave-frequency
distribution chart

$g=0\text{mm}$ を見てみると, $V=0.52\text{kV}$ と $V=1.03\text{kV}$ で比較すると, 油中のときに見られた電磁波の発生する周波数帯域が広くなるという特性は見られない. $g=1\text{mm}$, 3mm も同様に電磁波の発生する周波数帯域に広がりは見られない. また, 気中における部分放電から放射される電磁波の周波数帯域は $f=60\text{MHz}$ 付近で安定して確認することができ, その帯域における電磁波強度は印加電圧の増加に対して大きくなった. いずれの条件においても, 印加電圧を増加させることによって, どの周波数帯域においても電磁波強度が大きくなった. Fig.4 で示した外部ノイズとの区別をする. 外部ノイズでは 77MHz 付近で約 6.0mV の電磁波強度が出ている.

周波数と電磁波の強度の分布図を Fig.7 に示す. 気中での測定においては外部ノイズ波と混入する可能性が出てくる. ピークを読み取る際に $f=77\text{MHz}$ で出ている電磁波をカットしたのでこの分布図に外部ノイズ波は混入していない. $g=0\text{mm}$ の 2 つの分布図を比較してみると, ピークの中心周波数は $V=0.52\text{kV}$ では 70MHz 付近, $V=1.03\text{kV}$ では 75MHz 付近と中心周波数に変化はあまり見られなかった. $g=1\text{mm}$ では, 75MHz 付近から 65MHz となり, $g=3\text{mm}$

では、65MHz 付近から 60MHz 付近となっている。Fig.6 の電磁波強度一周波数特性のときに説明したように、いずれの条件においても周波数 $f=60\text{MHz}$ 付近に安定して電磁波が観測されることから、油中のときにみられた印加電圧を増加させると高い周波数に移行していく特性は見られず、 $f=60\text{MHz}$ 付近にピークが見られるようになる。また、 $f=60\text{MHz}$ 付近のピークは印加電圧の増加に対して大きくなる。

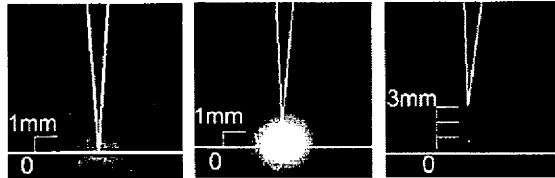
3.3 一眼レフカメラによる部分放電の観測

周波数と電磁波の強度の関係について調べてきたが、実際に針-平板電極間で生じている放電の様子についてイメージインテンシファイアを接続したカメラを用いて調べた。油中における正面からの放電の様子を Fig.9、気中における正面からの放電の様子を Fig.10 に示す。針電極下部にある線はガラス上部である。左端には印加電圧を示しており、油中では、上からそれぞれ $V=3.10\text{kV}$, 3.52kV , 3.72kV 、気中では上からそれぞれ $V=0.52\text{kV}$, 1.03kV , 1.29kV である。露光時間はすべて 1 秒である。また、Fig.9(a), Fig.10(a) は放電の大きさを示すためにメモリを表記した。

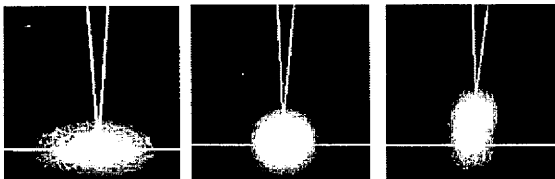
まず、Fig.9(a) の $g=0\text{mm}$ では、針先先端からガラスを沿う沿面放電が確認された。その放電は印加電圧の増加に伴って伸びていく。Fig.9(b) の $g=1\text{mm}$ では、針先の放電と沿面方向へと伸びる二つの放電の形態が見られ、沿面の伸びは印加電圧の増加に伴って大きくなる。Fig.9(c) の $g=3\text{mm}$ では、放電開始電圧の関係から $V=3.10\text{kV}$ では放電は確認できなかった。放電が発生してからは針先からガラスへと進展し、沿面へ伸びた。

次に、気中では、Fig.9(a), (b) の $g=0\text{mm}$, $g=1\text{mm}$ は油中のときと同様の放電が観測された。しかし、Fig.10(c) の $g=3\text{mm}$ では、針先からガラスへと放電が進展したもの、沿面放電はほとんど確認できなかった。Fig.10(c) の $V=0.52\text{kV}$ のようにガラス上部より下の発光はガラスによって反射したものである。これは、全ての写真に当てはまる。

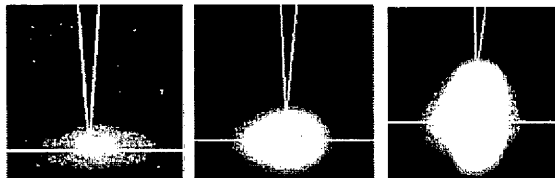
$V=3.10\text{kV}$



$V=3.52\text{kV}$



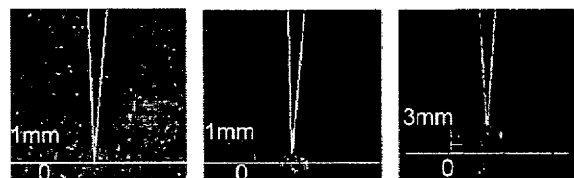
$V=3.72\text{kV}$



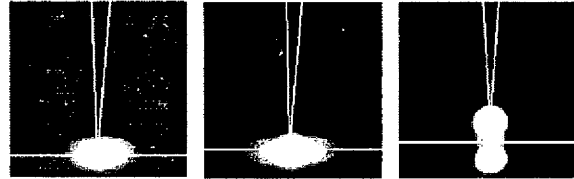
(a) $g=0\text{mm}$ (b) $g=1\text{mm}$ (c) $g=3\text{mm}$

図 9 正面からの部分放電の様子(油中)
Fig.9 Partial Discharge images in oil viewed from front

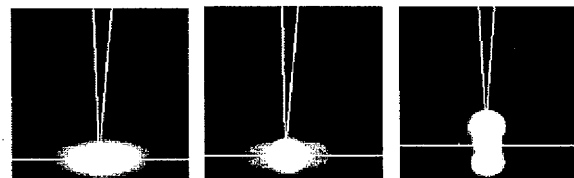
$V=0.52\text{kV}$



$V=1.03\text{kV}$



$V=1.29\text{kV}$



(a) $g=0\text{mm}$ (b) $g=1\text{mm}$ (c) $g=3\text{mm}$

図 10 正面からの部分放電の様子(気中)
Fig.10 Partial Discharge images in air viewed from front

Fig.11 に放電の沿面方向への伸びを分かりやすく表すためにモデル図に示した。また、放電の伸びと印加電圧の関係を Fig.12 に示す。ガラスを沿うように進展する放電が最も伸びた大きさを L とした。Fig.12(a) は油中、Fig.12(b) は気中の結果を示している。まず、油中では、印加電圧の増加に伴い放電の伸びは大きくなる。また、同じ印加電圧の場合、ギャップ長を小さくすることによって放電の伸びが大きくなる。

次に、気中では、 $g=0\text{mm}$, 1mm では少し異なるところもあるが、ほぼ同じ値となった。 $g=3\text{mm}$ のとき沿面放電がほとんど確認できなかったため、針先の放電を L としたのでこのような一定の線となった。 $g=0\text{mm}$, 1mm はほとんど同じ値になった。いずれも、印加電圧の増加と伴に伸びが大きくなる。

Fig.12 の二つの図を比較すると、油中では、 $V=3.72\text{kV}$ 以降もさらに伸びていくような曲線となるが、気中では $V=1.29\text{kV}$ 以降放電の伸びは停滞するような曲線となった。

放電発生時の電流・電圧波形を Fig.13 に示す。Fig.13(a) は $g=0\text{mm}$, $V=3.72\text{kV}$ 、Fig.13(b) は $g=3\text{mm}$, $V=3.10\text{kV}$ の波形となっている。まず、Fig.13(a) では、電圧の立ち上がりのところで $192\mu\text{A}$ の大きさの電流パルスが生じた。Fig.13(b) では、放電の観測のときに述べたように、放電開始電圧の関係から $V=3.10\text{kV}$ では放電は発生しないために電流パルスは生じない。印加電圧と電流パルスの関係について Fig.14 に示す。どのギャップ長においても印加電圧

を増加させると電流パルスは大きくなっている。また、ギャップ長を小さくすると、電流パルスは大きくなるという

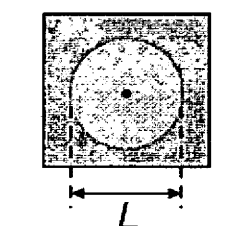


図 11 モデル図
Fig.11 Model diagram

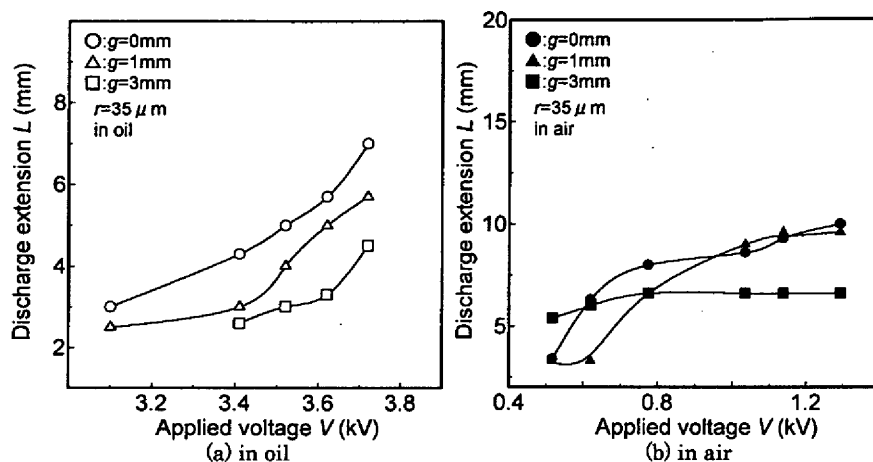


図 12 放電の伸びと印加電圧の関係
Fig.12 Relationship between the applied voltage and discharge extension

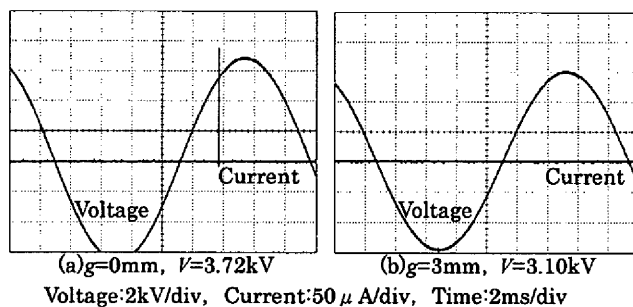


図 13 油中での電圧・電流波形
Fig.13 Voltage and current waveform in oil

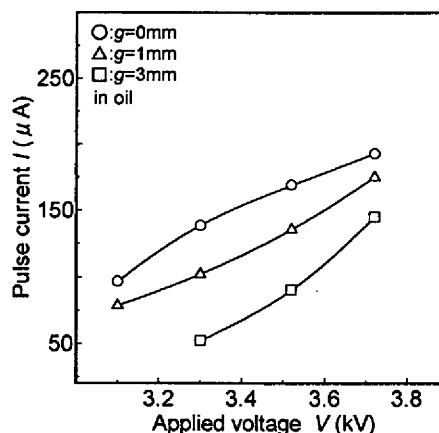


図 14 電流パルスの印加電圧依存性
Fig.14 Relationship between the applied voltage and current pulse

Fig.12 の印加電圧と放電の沿面方向への伸びの関係と同様の特性が得られた。つまり、電流パルスと放電の伸びにも比例関係があると考えられる。

4. 検討

本論文で述べた放電の様子、電流パルスの関係について考察する。放電の沿面方向への伸び、電流パルスの大きさは印加電圧の増加に伴って大きくなった。また、部分放電の発生に伴って、電磁波が発生すると今まで述べてきた。これは、部分放電中の伝導電流や変位電流が波源になると考えてよく、放射電磁波の特性は、電流パルスの波形に依存すると考えられている[16]。電流パルスの大小で考えると、印加電圧が高いときに電流パルスが大きくなる。よって、印加電圧の増加に対して電磁波の強度が大きくなると考えられる。また、コロナの沿面方向への伸びも印加電圧に依存することから、電磁波の強度はコロナの沿面方向への伸びに対して依存すると考えられる。また、大気中の絶縁耐力は約 30kV/cm[17]に対し、絶縁油中では約 100kV/cm となる[18]。絶縁耐力の違いから、針電極から放出される電子の速さに違いが出る。このことから、気中と油中では電流パルスの立ち上がりが大きく異なる。油中での立ち上がりは気中での立ち上がりに対して遅くなる。このことから、気中と油中で、部分放電から発生する電磁波の発生周波数帯域に違いが出ると考えられる。

次に、油中において、電磁波の発生する周波数と電磁波強度の分布をとったところ、印加電圧を高くすることによって高い周波数でピークが現われる特性が見られた。この特性の原因について考察する。3.2.1 章でも述べたように Fig.6(a)、(b)の $g=0\text{mm}$, 1mm の分布図では $V=3.10\text{kV}$ で 1 つのピーク、 $V=3.72\text{kV}$ で 2 つのピークとなった。 $V=3.72\text{kV}$ で見られる 2 つ目のピークは $f=150\text{MHz}$ 付近で確認することができる。これは、油中で部分放電の実験を行った際、コロナから放射される電磁波が $f=150\text{MHz}$ で頻繁に出る[14]ことからこのようにピークの中心周波数が高い周波数のほうに移行したと考えられる。 $g=3\text{mm}$ では、全体的に電磁波強度が小さかったために、 $V=3.31\text{kV}$ で 2 つのピークを確認することができた。つまり、油中における部分放電から放射される電磁波の周波数特性として、印加電圧が

低いときには $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波強度が弱いために分布図でのピークは低い周波数で出る。印加電圧を増加させることによって、 $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波強度が大きくなるために高い周波数にピークが生じると考えられる。気中では、 $f=60\text{MHz}$ 付近で安定して電磁波が観測されることから1つのピークとなっており、ピークの中心周波数の移行はほとんど見られなかった。今回の論文では、油中での測定に重点を置いたので、気中での測定においては今後更なる検討が必要となる。

5.まとめ

針一平板電極間で起こる部分放電から放射される電磁波強度と周波数の関係について調べた結果を以下にまとめる。

- (1)油中、気中のどちらの条件でもギャップ長 g を 0mm , 1mm , 3mm と大きくすると放電開始電圧は上昇した。
- (2)油中における電磁波強度一周波数特性から、印加電圧を増加させることによって電磁波の発生する周波数帯域が広くなり、電磁波強度も強くなる。さらに、周波数 $f=150\text{MHz}$ 付近の電磁波が頻繁に出るようになり、ピークが大きくなっている。
- (3)気中における電磁波強度一周波数特性から、印加電圧の増加で電磁波の発生する周波数帯域に変化は見られず、電磁波強度の強さに影響を与える。また、いずれの条件においても、周波数 $f=60\text{MHz}$ 付近でピークをとる結果となった。
- (4)放電の様子の観測から、油中では、いずれのギャップ長 g においても印加電圧を増加させることによって沿面方向への伸びは大きくなった。気中の $g=0\text{mm}$, 1mm では同様の特性となったが、 $g=3\text{mm}$ では沿面方向への伸びは確認できなかった。
- (5)電流・電圧波形から、いずれのギャップ長においても、印加電圧の増加に対して電流パルスは大きくなっている。また、ギャップ長を小さくすることによって電流パルスは大きくなった。

参考文献

- [1] 大久保仁：「電力機器の診断技術の現状と今後の課題」，電学論，119-B，pp.434-437(1999)
- [2] 小迫雅裕・大塚信也・松久高志・匹田政幸：「GIS 内の部分放電およびフリー異物により発生するラム波の時間周波数解析」，電学論，122-B，pp.719-724(2002)
- [3] 鶴見策郎・河野照哉・山本充義・河村達雄：「高電圧工学」，電気学会，p.137(1984)
- [4] R.Bartnikas：「Partial Discharge：Their Mechanism, Detection and Measurement」，IEEE Trans.DEI.9，p.763(2002)
- [5] E.Gulski：「Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer」，IEEE Trans. DEI.2，p.630 (1995)
- [6] 加藤達朗・早川直樹・匹田政幸・大久保仁：「部分放電特性の推移に基づく GIS 内絶縁破壊予知技術」，電学論，115-B，p.1193(1995)
- [7] A.G.Sellers, J.MacGregor and O.Farish：「Calibrating the UHF Technique of Partial Discharge Detection using a PD simulator」，IEEE Trans.DEI.2，p.46 (1995)
- [8] S.Meijer, E.Gulski and J.J.Smit：「Pattern Analysis of Partial Discharges in SF₆ GIS」，IEEE Trans. DEI.5，p.830 (1998)
- [9] 山下英城・加藤達朗・早川直樹・匹田政幸・植田俊明・大久保仁：「各種変電所における気中外部ノイズによる電磁波スペクトラム特性」，電学論，115-B，p.1208 (1995)
- [10] 鈴木雄一・川田昌武・河崎善一郎・松浦虔士・川崎誠：「位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定」，電学論，118-B，p.157(1998)
- [11] Y.Tian, P.L.Lewin, D.Pommerenke, J.S.Wilkinson, and S.J.Sutton：「Partial Discharge On-line Monitoring for HV Cable Systems Using Electrooptic Modulators」，IEEE Trans. DEI.11，p.861 (2004)
- [12] L.Peyraque, C.Boisdon, A.Beroual and F.Buret：「Statics Electrification and Partial Discharges induced by Oil Flow in Power Transformers」，IEEE Trans. DEI.2,p.40 (1995)
- [13] A.O.Akumu, H.Masai, F.Adachi, R.Ozaki, H.Ihori, M.Fujii and K.Arii：「Wavelet Analysis of Partial Discharge Acoustic Signals in a Model Transformer」，Jpn. J. Appl. Phys, 42, p.5347 (2003)
- [14] 東中俊幸・高橋利明・上野秀樹・中山博史・柿花邦彦：「外部アンテナを用いた部分放電による電磁波の検出」，平成 17 年電気学会全国大会講演論文集，5-235，p.339(2005)
- [15] 上野秀樹・渡部克典・中山博史：「N₂/SF₆, N₂/O₂ 混合ガス中における沿面放電特性」，静電学誌，23，No.5，pp.266-271(1999)
- [16] ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術調査専門委員会：「ガス絶縁機器における部分放電現象と検知技術の最新動向」，電気学会技術報告，982，p.11(2004)

- [17] 林泉：「高電圧プラズマ工学」，丸善株式会社，p.39(2001)
- [18] 鶴見策郎・河野照哉・山本充義・河村達雄：「高電圧工学」，電気学会，p.40(1984)